第40卷 第7期
2023年7月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

毛乌素沙地不同林龄杨柴灌木林土壤呼吸及其影响因素

海 龙[1,2]， 周 梅[1]， 张嘉開[1]， 洪光宇[2,3]， 李凤滋[2,3]， 费 菲[2]

（1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古自治区林业科学研究院，内蒙古 呼和浩特 010010；3. 内蒙古自治区沙地(沙漠)生态系统与生态工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010010）

摘 要： 为探究沙漠化逆转过程中林地土壤呼吸速率和通量变化趋势及其主要影响因子，本文选择毛乌素沙地林龄为9 a、18 a和30 a杨柴人工灌木林和未造林流动沙地（CK），用Li-8100A土壤碳通量监测系统对土壤呼吸速率进行定位观测，并对主要环境影响因子进行了测定。结果表明：(1) 土壤呼吸速率和通量均在植物生长季5—10月呈现出先升高后降低的单峰曲线变化规律，最高值出现在7月。(2) 土壤呼吸速率和通量随杨柴林龄增长呈持续增加趋势，而呼吸速率温度敏感性(Q_{10})则呈持续下降趋势。生长季5—10月杨柴林各样地土壤呼吸平均速率大小为：30 a(2.16 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) > 18 a(1.98 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) > 9 a(1.41 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) > CK(0.24 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)；土壤呼吸碳通量值大小顺序为：30 a(365.74 g $C \cdot m^{-2}$) > 18 a(313.63 g $C \cdot m^{-2}$) > 9 a(218.66 g $C \cdot m^{-2}$) > CK(40.08 g $C \cdot m^{-2}$)。(3) CK、9 a和18 a样地土壤呼吸速率季节性变化主要受土壤温度和水分的耦合作用($P < 0.01$)，而30 a样地的主控因子为土壤温度($P < 0.01$)。(4) 土壤呼吸碳通量与植被生物量、土壤有机碳和全氮含量均呈显著正相关关系($P < 0.05$)。

关键词： 土壤呼吸；影响因素；杨柴；毛乌素沙地

土壤呼吸(Soil Respiration)是指未扰动土壤产生二氧化碳并向大气释放的过程，是生态系统碳循环过程中的一个重要环节，在区域和全球尺度上对大气二氧化碳浓度调控起着关键作用[1-3]。据统计，全球每年以土壤呼吸的形式向大气释放60~98 Pg的碳，是人类活动排放碳总量的6~7倍[4-5]。因此，土壤呼吸作用的微小变化可能会引起大气二氧化碳浓度的明显改变，并可能对全球气候变化产生正反馈效应[6]。

在我国北方干旱半干旱地区，因植被和土壤稳定性差，土壤有机碳含量相对较低，土壤呼吸是生态系统碳损失的主要过程之一，也是生态系统对气候变化最敏感的响应过程之一[7-8]。随着人工林建植和发育，其物种组成、群落结构、生物量积累以及土壤性状等均随林龄发生相应的变化，进而导致土壤呼吸过程存在显著差异[9-11]。崔羽等[12]对金沙江下游银合欢人工林研究显示，土壤呼吸速率随着林龄的增加而减小，Zhao等[13]对沙尘暴源区山杨人工林的研究也得出相同的结果；而Gao等[14]对西双版纳橡胶人工林研究发现，土壤呼吸速率随林龄增大呈现先增后减的趋势。在我国北方干旱半干旱沙地、沙漠地区，随着人工防风固沙植被的可持续恢复，土壤呼吸速率及通量的基本变化规律以及呼吸过程对植被因子、土壤水热因子和理化性质变化的响应机理研究相对较少，特别是土壤呼吸与多个影响因子的耦合关系尚不清楚。

杨柴(*Hedysarum laeve*)是我国北方沙区防风固沙先锋树种，其造林方式有人工植苗和直播造林两种，而直播造林又以飞播为主[15-17]。毛乌素沙地鄂尔多斯地区自20世纪80年代起实施杨柴规模化防沙治沙造林工程，经近40 a的治理，形成了大规模的人工植被恢复区，学者从杨柴水分生理生态[18-19]、土

收稿日期： 2022-10-20； **修订日期：** 2022-12-04
基金项目： 国家自然科学基金项目(41867043)；内蒙古自治区草原英才青年创新人才项目(内人社办发[2020]214号)；鄂尔多斯市科技重大专项[2022EEDSKJZDZX010-3-(3)]
作者简介： 海龙(1980-)，男，研究员，博士，主要从事森林经理、森林碳汇研究. E-mail: nmhailong@163.com
通讯作者： 周梅. E-mail: zhoumei@imau.edu.cn

壤水分动态特征[20-21]、根系特征[22]、群落空间异质性[23]等方面开展了深入研究。本文以毛乌素沙地杨柴人工灌木林为研究对象，从人工林群落发展的不同时间尺度上进行土壤呼吸动态观测，阐明杨柴人工灌木林生长季土壤呼吸速率、通量随植被恢复年限的变化规律及对主要环境因子的响应特征，为今后沙地杨柴防风固沙林固碳增汇经营、沙地生态系统碳汇功能评估提供科学指导和参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地（37°27.5′N~39°22.5′N，107°20′E~111°30′E）是我国四大沙地之一，横亘内蒙古鄂尔多斯市南部、陕西省榆林市北部、宁夏吴忠市盐池县东北部，总面积为3.8×10⁴ km²。本研究在毛乌素沙地鄂尔多斯市乌审旗乌兰陶勒盖治沙站2011年、2002年杨柴造林地和乌审召治沙站1990年杨柴造林地进行。该区域属于温带半干旱大陆性季风气候，平均年降水量270~350 mm，降水主要集中于6—9月，平均年蒸发量1800~2500 mm；年平均气温7.2 ℃，年平均总日照时数2900 h，无霜期约为113~156 d，平均海拔1300 m，土壤类型为风沙土；植物种以沙柳（*Salix cheilophila*）、杨柴（*Hedysarum leave*）、花棒（*Hedysarums coparium*）、柠条锦鸡儿（*Caragana korshinskii*）、油蒿（*Artemisia ordosica*）等灌木为主[23-24]。

1.2 试验样地设置与调查

（1）样地设置。选择1990年、2002年、2011年营造的杨柴防风固沙林，分别设置了20 m×20 m的固定样地两块，杨柴造林前立地类型均为流动沙地，造林后无浇水、除草等经营措施，处于长期封育状态，无病虫害、火灾发生，杨柴种群天然更新良好；另设置两块未造林流动沙地样地作为对照。

（2）指标调查与测定。在已选好的固定样地内设5个5 m×5 m样方，用目测法测定灌木盖度，直接统计灌木种类和数量，用钢卷尺测量高度，刈割灌木全部地上部分测定生物量。在灌木调查样方内再设1 m×1 m小样方，用上述方法测定样方内草本盖度、和地上生物量，采集样方内全部枯落物并测定现存量，最后按样方规格挖开1 m深的土壤剖面，收集全部植物根系并测定生物量；采集0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层样品各300 g左右带回实验室，用重铬酸钾-外加热法测定有机碳含量，用凯氏定氮法测定全氮含量[25]，试验样地详细信息见表1。

1.3 土壤呼吸测定

于2019年9月，在已选好的每块固定样地设置5个3 m×3 m的土壤呼吸观测样方，样方间距>7 m，采用内径20 cm的聚氯乙烯环（PVC）制作高15 cm的垫圈，在每个样方土壤中插入13 cm，地面留2 cm，共设40个PVC环测定土壤呼吸。测定前一天剪除垫圈内植被地上部分，采用美国LI-COR公司生产的Li-8100A土壤碳通量观测系统，从2020年5—10月进行土壤呼吸速率连续定位测定，每个月测定1~2次，每次选择3~4个天气晴朗的工作日进行24 h昼夜观测，白天从06:00—18:00每隔2 h测一次，夜间18:00至次日06:00每隔3 h测一次。用土壤温度和水分自动记录仪对土壤5 cm、10 cm、20 cm和30 cm土层温度和含水率同步测定，数据记录间隔期为30 min。

1.4 数据处理与分析

运用指数回归模型描述土壤呼吸速率与土壤温度的关系[26]，并计算土壤呼吸速率的温度敏感性（Q_{10}）[27]，如公式（1）和公式（2）：

$$R_s = ae^{bT} \quad (1)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

运用线性回归模型描述土壤呼吸速率与土壤含水量的关系[28]，如公式（3）：

$$R_s = a + bW \quad (3)$$

表1 杨柴灌木林及对照试验地基本信息

Tab. 1 Basic information of *Hedysarum leave* shrubbery and control experimental field

样地编号	造林年份	地理位置	造林方式	灌木盖度/%	草本盖度/%	优势物种	重要值
CK	–	109°13′54.15″E，38°53′13.54″N	–	–	–	–	–
9 a	2011年	109°14′32.26″E，38°51′36.25″N	植苗	70.0±1.53b	20.0±3.51c	杨柴	0.742
18 a	2002年	109°14′22.78″E，38°51′48.73″N	飞播	96.0±0.55a	25.0±2.95b	杨柴	0.703
30 a	1990年	109°15′34.25″E，39°02′47.41″N	飞播	98.0±0.71a	35.0±3.56a	杨柴	0.748

注：CK代表未造林流动沙地，9 a代表2011年杨柴造林样地，18 a代表2002年杨柴造林样地，30 a代表1990年杨柴造林样地。

运用多元线性和非线性模型描述土壤温度、含水量的交互作用对土壤呼吸速率的影响[29],如公式(4)和公式(5):

$$R_s = a e^{bT} W^C \quad (4)$$

$$R_s = a + bT + cW \quad (5)$$

生长季土壤呼吸碳通量计算采用日通量累加法,日通量为每天土壤呼吸速率平均值乘以24 h,计算公式如下:

$$R_{sy} = \sum R_{smi} \quad (6)$$

式中:R_s为土壤呼吸速率(μmol·m^{-2}·s^{-1});T为土壤温度(℃);W为土壤含水量(%);R_{sy}为生长季土壤呼吸碳通量(g C·m^{-2});R_{smi}为土壤呼吸日通量(g C·m^{-2});a、b、c为常数。

为对比各样地土壤呼吸速率和通量,采用回归分析法拟合每个样地土壤呼吸速率与土壤温度、含水量的单因素和双因素模型。用每块样地土壤温度和含水率连续自动记录数据,代入回归模型后得到每隔30分钟的土壤呼吸速率,用时间乘以呼吸速率得到每天的呼吸通量,以天为时间步长累加得出生长季土壤呼吸通量。

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较土壤呼吸差异性,并用邓肯(Duncan)多重比较法检验显著性。应用多元回归模型分析环境因子对土壤呼吸的相对重要性;所有数据分析由SPSS 22.0完成,图表绘制由Sigmaplot 12.0完成。

2　结果与分析

2.1　土壤温度和含水率的季节变化特征

植物生长季各观测样地0~30 cm土层平均温度月变幅为10.88~25.82 ℃,均表现为先升高后下降的变化趋势(图1a)。生长季土壤最高温度出现在6—7月,最低温度均出现在10月。各样地0~30 cm土层平均土壤含水率均在9月雨季出现最高值,6—7月的旱季最低(图1b),随着杨柴灌木林林龄的增长,土壤含水量月变幅呈减小趋势。

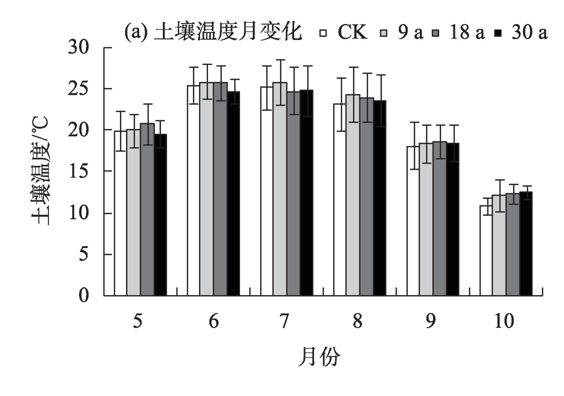
2.2　土壤呼吸季节变化特征

2.2.1　土壤呼吸速率季节变化　根据最优回归模型计算杨柴林生长季土壤呼吸速率,得出CK和林龄9 a、18 a、30 a土壤呼吸速率变化范围分别为0.14~0.34 μmol·m^{-2}·s^{-1}和0.67~2.14 μmol·m^{-2}·s^{-1}、1.26~2.69 μmol·m^{-2}·s^{-1}、1.25~3.07 μmol·m^{-2}·s^{-1}。在5—10月,土壤呼吸速率整体呈现先升高后降低的趋势,最高值出现在7月,最低值出现在10月(图2)。

2.2.2　土壤呼吸通量季节变化　从图3可知,生长季5—10月各样地土壤呼吸通量变化整体呈现先升高后降低的趋势,最高值出现在7月,最低值出现在10月。方差分析结果显示,各月不同样地土壤呼吸通量之间存在显著差异(P<0.05)。CK和林龄9 a、18 a、30 a生长季土壤呼吸通量分别为44.12 g C·m^{-2}和228.53 g C·m^{-2}、332.01 g C·m^{-2}、368.55 g C·m^{-2},与未造林流动沙地相比,3个林龄杨柴林地生长季土壤呼吸通量分别增加了5.2倍、7.5倍和8.4倍,表明杨柴灌木林植被恢复加强了沙地土壤呼吸作用。

2.3　土壤呼吸速率影响因素

2.3.1　呼吸速率与温度、含水量的关系　采用指数模型拟合土壤温度与土壤呼吸速率(表2),CK样地土壤呼吸速率与5 cm土层温度显著正相关(P<0.05),而各林龄杨柴样地土壤呼吸速率与不同土层温度均达到极显著相关(P<0.01)。采用线性模型拟合不同深度土壤含水量与土壤呼吸速率(表2),发现林龄9 a、18 a的杨柴样地土壤呼吸速率与土壤含



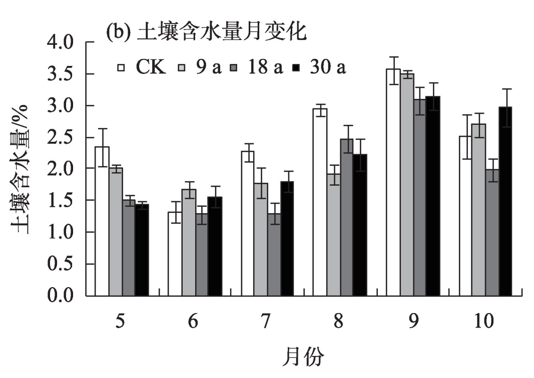


图1　不同林龄杨柴灌木林土壤温度和含水量的月变化趋势

Fig. 1　The monthly trend of soil temperature and soil moisture content in different ages *Hedysarum leave* shrubbery

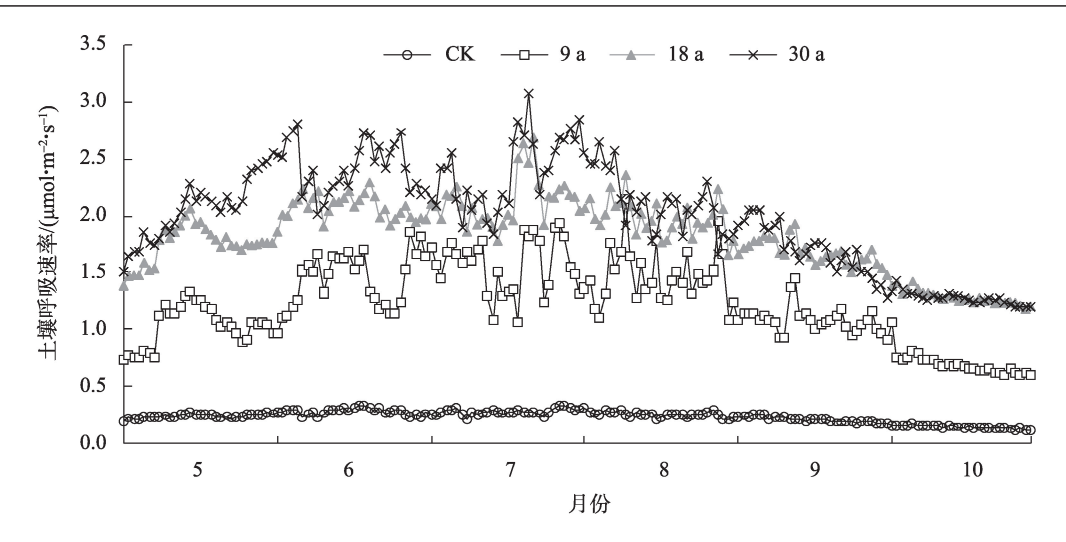
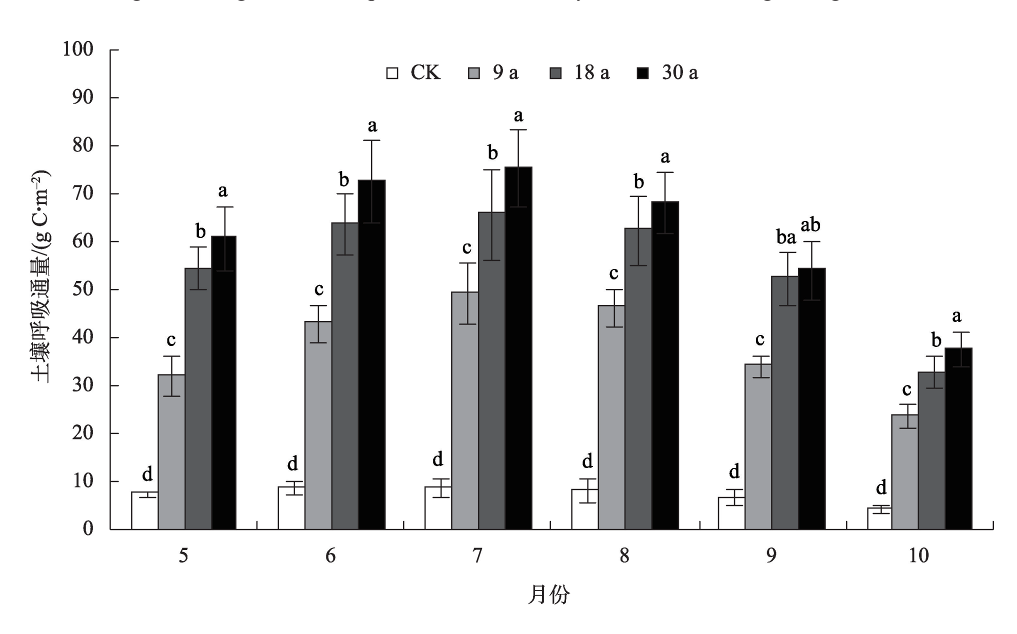


图2 生长季5—10月土壤呼吸速率变化

Fig. 2 Changes of soil respiration rate from May to October in the growing season



注：不同小写字母表示相同月份不同样地间土壤呼吸通量差异显著($P<0.05$)。

图3 不同林龄杨柴灌木林生长季5—10月土壤呼吸通量

Fig. 3 Soil respiration flux of different ages *Hedysarum leave* shrubbery from May to October in growing season

水量呈极显著相关(P<0.01)，而CK、30 a样地土壤呼吸速率与土壤含水量相关性不显著(P>0.05)。

采用线性和非线性双因素复合模型拟合土壤温度、含水量交互作用对土壤呼吸速率的影响(表3)。结果表明，除30 a杨柴样地外，CK和9 a、18 a杨柴样地双因素复合模型比单因素模型拟合效果更优，土壤温度和含水量能够共同解释了土壤呼吸速率月变化的52.1%、90.4%和73.4%，表明土壤温度和水分耦合作用对沙地土壤呼吸作用的影响显著。

2.3.2 土壤呼吸速率与其他影响因素的相关性 从表4可知，随着杨柴灌木林的发育，植被生物量、枯落物现存量、根系生物量、土壤全氮和有机碳含量均随林龄逐渐增加，且不同林龄之间差异显著(P<0.05)。

由多元线性回归模型分析发现(表5)，生长季土壤呼吸通量与植被生物量、土壤有机碳含量和全氮含量均显著相关(P<0.05)，相对重要性分别为29.6%(P<0.001)、18.6%(P<0.05)和16.8%(P<0.01)。根据主要影响因子建立的回归模型为：

$$Y=39.14+0.04X_1+15.45X_2+0.01X_3+96.72X_4+0.03X_5\ (R^2=0.997,\ P<0.001) \quad (7)$$

表2 土壤呼吸速率与土壤温度、含水率的单因素模型和温度敏感性

Tab. 2 Single-factor models of soil respiration rate with soil temperature and moisture & temperature sensitivity

样地	土层深度/cm	$R_s=ae^{bT}$			$R_s=a+bW$			Q_{10}
		a	b	R^2	a	b	R^2	
CK	5	0.088	0.041	0.263*	0.188	1.722	0.034	1.507
	10	0.124	0.027	0.024	0.194	1.051	0.019	1.310
	20	0.138	0.022	0.011	0.231	−0.101	0.001	1.246
	30	0.158	0.015	0.001	0.254	−0.725	0.009	1.162
9 a	5	0.271	0.057	0.682**	0.468	30.907	0.353**	1.768
	10	0.282	0.059	0.694**	0.113	29.576	0.428**	1.804
	20	0.291	0.059	0.647**	1.190	−6.433	0.006	1.804
	30	0.289	0.060	0.617**	0.947	2.420	0.001	1.822
18 a	5	0.520	0.056	0.401**	1.046	22.006	0.485**	1.751
	10	0.480	0.057	0.391**	0.740	31.758	0.414**	1.768
	20	0.495	0.058	0.373**	0.855	27.306	0.448**	1.786
	30	0.417	0.060	0.359**	0.868	26.785	0.453**	1.822
30 a	5	0.777	0.044	0.690**	1.676	12.721	0.045	1.553
	10	0.789	0.045	0.677**	2.051	0.170	0.001	1.568
	20	0.821	0.045	0.643**	1.831	10.118	0.021	1.568
	30	0.781	0.047	0.570**	1.826	10.257	0.026	1.600

注：R_s为土壤呼吸速率，a、b、e均为常数，T为土壤温度，W为土壤含水量；*表示$P<0.05$，**表示$P<0.01$。下同。

表3 土壤呼吸速率与土壤温度和含水率双因素模型

Tab. 3 Two-factor model of soil respiration with soil temperature and soil moisture content

样地	$R_s=a+bT+cW$				$R_s=ae^{bT}W^c$			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
CK	−0.035	0.010	2.251	0.387**	0.236	0.043	0.251	0.521**
9 a	−0.897	0.056	27.002	0.904**	2.863	0.057	0.637	0.904**
18 a	0.105	0.047	19.360	0.713**	2.025	0.035	0.257	0.734**
30 a	0.366	0.060	15.653	0.510**	1.939	0.029	0.156	0.539**

表4 不同林龄杨柴灌木林部分生物和非生物因子特征

Tab. 4 Characteristics of some biological and abiotic factors in different ages *Hedysarum leave* shrub forest

林龄	植物地上生物量/(kg·hm^{-2})	枯落物现存量/(g·m^{-2})	根系生物量/(g·m^{-2})	土壤全氮含量/(g·kg^{-1})	土壤有机碳含量/(g·kg^{-1})
9 a	1911.1±180.4a	118.0±16.8a	194.3±78.6a	0.12±0.03a	0.63±0.09a
18 a	3226.9±243.9b	222.8±31.4b	526.0±129.1b	0.14±0.03a	1.10±0.23b
30 a	4289.2±165.1c	365.1±101.4c	635.4±171.5b	0.15±0.02b	1.27±0.03c

注：小写字母表示相同指标在不同林龄样地之间存在显著差异(P<0.05)。

表5 土壤呼吸通量与生物和非生物因子多元回归结果

Tab. 5 Multiple regression results of soil respiration flux and biological and abiotic factors

	调整后的(R^2)	截距	显著性(P)	斜率	各变量相对重要性
多元回归模型	0.997	39.14	0.001***	–	–
植被生物量	–	–	0.001**	0.04	0.296
有机碳	–	–	0.017*	15.45	0.186
根系生物量	–	–	0.288	0.01	0.173
全氮	–	–	0.037*	96.72	0.168
枯落物现存量	–	–	0.174	0.03	0.176

注：***表示P<0.001；**表示0.001<P<0.01；*表示0.01<P<0.05。

式中：Y为土壤呼吸通量；X_1为植物地上生物量；X_2为有机碳含量；X_3为土壤全氮含量；X_4为根系生物量；X_5为枯落物现存量。

2.3.3 呼吸温度敏感性(Q_{10})变化特征 根据土壤温度指数函数模型得到季节尺度不同样地土壤呼吸速率的Q_{10}值(表2)，CK和林龄9 a、18 a、30 a杨柴林的Q_{10}值变化范围分别为1.16~1.51和1.77~1.82、1.75~1.82、1.55~1.60，杨柴林植被恢复过程中Q_{10}值表现出先增后降的变化趋势。其中，9 a、18 a和30 a样地Q_{10}值均对30 cm土层温度最敏感，对5 cm土层温度敏感性最低，而CK样地对5 cm土层温度的敏感性均高于其他土层。

3 讨 论

3.1 土壤呼吸速率和通量

赵江平等[30]对黄土丘陵区柠条人工林土壤呼吸速率的观测结果表明，5—10月土壤呼吸速率呈单峰趋势，均在7月最高，10月最低，5—10月土壤呼吸速率均值为3.15 μmol·m^{-2}·s^{-1}。胡东等[31]在6—9月对锡林河流域锦鸡儿灌丛的土壤呼吸速率进行观测，发现锦鸡儿灌丛的土壤呼吸速率在6月达到峰值(3.81 μmol·m^{-2}·s^{-1})。马笑丹等[32]通过分析黄河三角洲不同生境条件下柽柳灌丛土壤呼吸速率，春、夏、秋3个季节变化范围为0.31~3.42 μmol·m^{-2}·s^{-1}。本研究中9 a、18 a和30 a杨柴灌木林生长季土壤呼吸速率变化范围分别为0.67~2.14 μmol·m^{-2}·s^{-1}、1.26~2.69 μmol·m^{-2}·s^{-1}和1.25~3.07 μmol·m^{-2}·s^{-1}，最高值出现在7月，平均值分别为1.28 μmol·m^{-2}·s^{-1}、1.83 μmol·m^{-2}·s^{-1}、2.14 μmol·m^{-2}·s^{-1}。毛乌素沙地杨柴林生长季土壤呼吸速率总体上低于区域研究结果。

李洪建等[33]用动态气室法对黄土高原东部山区黄刺玫、沙棘灌丛地土壤碳通量进行测定结果表明，土壤碳通量的最大值出现在土壤温度和水分均较高的6—7月，最低值出现在冬春季以及其他较为干旱的月份。本文杨柴灌木林生长季土壤呼吸通量整体呈现先升高后降低的趋势，最高值也出现在7月，最低值在10月(图3)，这一规律与内蒙古羊草草原地区的研究的结果相一致[34]。

3.2 土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})

利用不同土层温度拟合4个观测样地土壤呼吸速率，得出平均Q_{10}值分别为1.31(CK)、1.80(9 a)、1.78(18 a)和1.57(30 a)，随着杨柴林的生长发育，Q_{10}值呈先增后减的变化趋势。王博等[10]研究发现，库布齐沙漠植被恢复过程中土壤呼吸Q_{10}值呈下降趋势，与本研究结果相似，说明在气候变暖背景下，土壤呼吸敏感性随植被恢复趋于下降，有利于维持土壤碳库的稳定。本研究中，沙地杨柴人工林土壤呼吸Q_{10}值低于全球尺度Q_{10}值(2.03~2.40)[35]和中国陆地生态系统的平均Q_{10}值(1.80~3.05)[36]。但Q_{10}值受植被变化、环境水热条件、土壤理化性质等多种因素的综合影响，存在一定的不确定性，上述结论需在今后继续开展相关试验研究进行验证。

3.3 土壤呼吸与水热因子的相关性

温度是在季节尺度上调节和控制土壤呼吸速率变化的主要影响因素之一[37]。目前，研究土壤呼吸与温度间相互关系的方程有多种[38-40]，而最终得到的一致性结论，在一定温度范围内，随温度的升高，土壤呼吸速率显著增加。本研究采用指数函数模型模拟土壤呼吸速率与不同土层温度之间的关系，结果显示生长季土壤呼吸速率均与5 cm土层温度呈显著正相关，与同类研究得出的结论相似[35,41]。通常，表层土壤热量变化较敏感，也是土壤微生物活性和根呼吸酶活性随温度的提高而增强，进而导致土壤呼吸作用加强[42]。此外，土壤含水量是影响干旱半干旱地区土壤呼吸速率变化的重要环境要素，对地上植被、土壤中根系生长发育和微生物活性等与土壤呼吸密切相关的生物因子起调控作用[43]。诸多研究显示，土壤水分对呼吸速率的影响具有复杂性与不确定性，存在正相关[44]、负相关[45]及不相关等特征[46]。本研究中，CK样地土壤呼吸速率与土壤含水量相关性并不显著，这与丁金枝等[28]在毛乌素沙地的研究结果一致。9 a和18 a杨柴林样地土壤呼吸速率与土壤含水量极显著相关，而30 a样地土壤呼吸速率与土壤含水量相关性并不显著。这可能是因为在水分匮乏的沙地生态系统，植被盖度相对低的9 a、18 a样地表层土壤降水入渗和蒸散过程较快，土壤呼吸对水分变化的响应十分敏感；而在盖度较高的30 a样地，受植被层截留和遮阴作用上述水分物理过程较缓慢，土壤呼吸对其响应敏感度相对低。

3.4 沙地土壤呼吸与植被生物量的相关性

植被生物量对土壤呼吸的影响，一是通过地上

凋落物和地下死根等有机碎屑物的输入和分解过程驱动土壤异养呼吸作用[47]。二是通过地下持续积累的活根系生命活动促进自养呼吸作用[48-49]。本研究发现,9 a、18 a和30 a林地地上植被和地下根系生物量依次为1911.13 kg·hm^{-2}、3226.98 kg·hm^{-2}、4289.22 kg·hm^{-2}和194.3 kg·hm^{-2}、526.0 kg·hm^{-2}、635.4 kg·hm^{-2},生物量随林龄均呈增加的规律,30 a林地生长季土壤呼吸通量较9 a和18 a分别提高45.3%和61.3%。杨柴灌木林植被生物量与土壤呼吸通量之间存在极显著正相关关系(P<0.01)。该研究结果与袁渭阳等[50]在四川巨桉林、刁银霞等[51]在长白山苔原植被开展土壤呼吸与植被变化关系的研究结论相一致。

3.5 土壤呼吸与有机碳、全氮含量的相关性

土壤有机碳是微生物分解活动和植物生长发育的主要养分源,氮素是氨基酸、蛋白质、核苷酸和辅酶的组成元素,碳和氮的积累能够有效提升土壤微生物和酶的活性,从而加强土壤呼吸作用[52-54]。随着造林年限的增加,林龄9 a、18 a和30 a杨柴林土壤有机碳含量依次为0.63 g·kg^{-1}、1.10 g·kg^{-1}和1.27 g·kg^{-1},全氮含量依次为0.12 g·kg^{-1}、0.14 g·kg^{-1}和0.15 g·kg^{-1}。回归分析结果表明,杨柴灌木林土壤呼吸与有机碳和全氮含量之间存在显著正相关关系(P<0.05)。

4 结 论

(1) 在植物生长季,毛乌素沙地不同林龄杨柴灌木林土壤呼吸速率整体呈现先升高后降低的趋势,最高值均出现在夏季7月。流沙地(CK)和林龄为9 a、18 a杨柴地土壤呼吸速率季节变化主要受土壤温度和含水量的共同作用,而林龄30 a林地土壤呼吸速率季节性变化的主控因子为土壤温度。

(2) 生长季5—10月不同林龄杨柴灌木林土壤呼吸通量为30 a(365.74 g C·m^{-2}) > 18 a(313.63 g C·m^{-2}) > 9 a(218.66 g C·m^{-2}) > CK(40.08 g C·m^{-2})。

(3) 随着杨柴林龄的增长,植被生物量、土壤有机碳和全氮含量的持续增加显著加强了林地土壤呼吸作用,土壤呼吸通量显著提高。

(4) 土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10}值)随着杨柴灌木林的生长发育,表现出先增加后降低的变化趋势,在气候变暖的背景下沙地植被恢复有助于稳定土壤呼吸作用。

参考文献(References):

[1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44(2): 81-99.

[2] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(7081): 165-173.

[3] Bond-Lamberty B, Thomson A. A global database of soil respiration data[J]. Biogeosciences, 2010, 7: 1915-1926.

[4] 於琍, 朴世龙. IPCC第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 33-36. [Yu Li, Piao Shilong. Key scientific points on carbon and other biogeochemical cycles from the IPCC fifth assessment report[J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(1): 33-36.]

[5] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.

[6] Guo Zhaodi, HU Huifeng, Li Pin, et al. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008[J]. Science China Life Sciences, 2013, 56(7): 661-671.

[7] Jacobson M, Charlson R J, Rodhe H, et al. Earth System Science From Biogeochemical Cycles to Global Changes[M]. San Diego: Academic Press, 2000.

[8] West N E, Stark J M, Johnson D W, et al. Effects of climatic change on the edaphic features of arid and semiarid lands of western North America[J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 1994, 8(4): 307-351.

[9] 罗明霞, 胡宗达, 刘兴良, 等. 川西亚高山不同林龄粗枝云杉人工林土壤微生物生物量及酶活性[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5632-5642. [Luo Mingxia, Hu Zongda, Liu Xingliang, et al. Soil microbial biomass and enzyme activity of *Picea crassica* plantation with different ages in subalpine of western, Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5632-5642.]

[10] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 库布齐东缘沙漠化逆转过程中土壤呼吸及其温度敏感性变化[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 104-112. [Wang Bo, Duan Yuxi, Wang Weifeng, et al. Variations of soil respiration and its temperature sensitivity in the reversion process of desertification in the eastern Hobq Desert, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 104-112.]

[11] 卞莹莹, 张志敏, 付镇, 等. 荒漠草原区不同植被恢复模式土壤微生物菌落分布特征及其与土壤理化性质的相关性[J]. 草地学报, 2021, 29(4): 655-663. [Bian Yingying, Zhang Zhimin, Fu Zhen, et al. Distribution characteristics of soil microbial communities of different vegetation restoration models and their correlation with soil physical and chemical properties in desert steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(4): 655-663.]

[12] 崔羽, 严思维, 吴建召, 等. 不同林龄银合欢生长季土壤呼吸影响因素分析[J]. 武夷学院学报, 2018, 37(9): 31-38. [Cui Yu, Yan Siwei, Wu Jianzhao, et al. Analyzing the factors that affect soil respiration during the growing season in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit[J]. Journal of Wuyi College, 2018, 37(9): 31-38.]

[13] Zhao Xin, Li Fadong, Zhang Wanjun, et al. Contribution of aboveground litter to soil respiration in *Populus davidiana* Dode plantations at different stand ages[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(6): 1000-1012.

[14] Gao Jinbo, Zhang Yiping, Song Qinghai, et al. Stand age-related effects on soil respiration in rubber plantations (*Hevea brasiliensis*) in Southwest China[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70 (6): 1221-1233.

[15] 洪光宇, 王晓江, 张雷, 等. 毛乌素沙地不同林龄杨柴灌木林土壤剖面水分变化特征[J]. 内蒙古林业科技, 2016, 42(4): 6-9. [Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Zhang Lei, et al. Variation characteristics of soil profile moisture of *Hedysarum laeve* shrubs at different stand ages in Maowusu Sandy Land[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2016, 42(4): 6-9.]

[16] 周振林. 飞播草地植被演替动态研究[J]. 内蒙古草业, 1995, 9 (Z1): 35-38. [Zhou Zhenlin. Study on vegetation succession dynamics of flying grassland[J]. Inner Mongolia Pratacultural Industry, 1995, 9(Z1): 35-38.]

[17] 沈渭寿. 毛乌素沙地飞播植被演替的阶段与速度[J]. 林业科学, 1999, 35(3): 103-108. [Shen Weitao. Successional stage and rate of the aerial seeding vegetation in the Maowusu sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(3): 103-108.]

[18] 韩钢, 赵忠. 不同土壤水分下4种沙生灌木的光合光响应特性[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4019-4026. [Han Gang, Zhao Zhong. Light response characteristics of photosynthesis of four xerophilous shrubs under different soil moistures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4019-4026.]

[19] 洪光宇, 王晓江, 张雷, 等. 毛乌素沙地杨柴茎流速率动态研究[J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(4): 35-38. [Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Zhang Lei, et al. Dynamic study on stem sap flow rate of *Hedysarum fruiticosum* var. *mongolicum* in Mu Us sandy land [J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2018, 44(4): 35-38.]

[20] 穆家伟, 查天山, 贾昕郭, 等. 毛乌素沙地典型沙生灌木对土壤蒸发的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(12): 39-45. [Mu Jiawei, Zha Tianshan, Jia Xinguo, et al. Influence of typical sandy shrubs on soil evaporation in Mu Us Sandland, northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(12): 39-45.]

[21] 洪光宇, 王晓江, 刘果厚, 等. 毛乌素沙地杨柴灌木林土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 76-83, 121. [Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Liu Guohou, et al. Response of soil Moisture to different rainfall patterns in *Hedysarum Leave* in Mu Us sandy land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 76-83, 121.]

[22] 张雷, 王晓江, 洪光宇, 等. 毛乌素沙地不同飞播年限杨柴根系分布特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 39-34. [Zhang Lei, Wang Xiaojian, Hong Guangyu, et al. Root distribution characteristics of *Hedysarum laeve* with different aerial seeding years in Mu Us Sandy Land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 39-34.]

[23] 张雷, 洪光宇, 李卓凡, 等. 基于微地形的毛乌素沙地飞播杨柴生长特征空间异质性研究[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(4): 10-13. [Zhang Lei, Hong Guangyu, Li Zhuofan, et al. Study on spatial heterogeneity of growth characteristics of *Hedysarum leave* by aerial seeding based on the microtopography in Mu Us Sandy Land[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2017, 43(4): 10-13.]

[24] 李卓凡, 苏和, 王晓江, 等. 毛乌素沙地飞播杨柴林平茬复壮成效分析[J]. 内蒙古林业科技, 2021, 47(2): 6-9, 14. [Li Zhuofan, Su He, Wang Xiaojiang, et al. Analysis on stumping rejuvenation effect of aerial seeded *Hedysarum mongolicum* Shrubs in Mu Us Sandy Land[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2021, 47(2): 6-9, 14.]

[25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil Agrochemical Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[26] Luo Yiqi, Wan Shiqiang, Hui Dafeng, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413: 622-625.

[27] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. Global Change Biology, 2002, 8(9): 851-866.

[28] 丁金枝, 来利明, 赵学春, 等. 荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1594-1603. [Ding Jinzhi, Lai Liming, Zhao Xuechun, et al. Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1594-1603.]

[29] 汪金松, 范娟, 赵秀海, 等. 太岳山油松人工林土壤呼吸组分及其影响因子[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 1-7. [Wang Jinsong, Fan Juan, Zhao Xiuhai, et al. Soil respiration components and its controlling factors in a *Pinus Tabulaeformis* plantation in Taiyue mountain, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(2): 1-7.]

[30] 赵江平, 陈峰峰, 董从国, 等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤呼吸速率对碳输入方式改变的响应[J]. 西北林学院学报, 2022, 37 (4): 1-9. [Zhao Jiangping, Chen Fengfeng, Dong Congguo, et al. Response of soil respiration to carbon input in caragana korshinskii plantation in loess hilly region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 1-9.]

[31] 胡东, 刘成立, 马晓慧, 等. 火烧对小叶锦鸡儿灌丛土壤呼吸速率的影响[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 19-23, 29. [Hu Dong, Liu Chengli, Ma Xiaohu, et al. Burning effects on the soil respiration rate of from *Caragana microphylla*[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2010,

31(3): 19–23, 29.]

[32] 马笑丹, 刘加珍, 陈永金, 等. 黄河三角洲柽柳灌丛对周边土壤呼吸的影响研究[J]. 地球环境学报, 2022, 13(4): 405–417. [Ma Xiaodan, Liu Jiazhen, Chen Yongjin, et al. Effects of *Tamarix chinensis* shrub on soil respiration in the Yellow River Delta[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(4): 405–417.]

[33] 李洪建, 严俊霞, 李君剑, 等. 黄土高原东部山区两种灌木群落的土壤碳通量研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1895–1904. [Li Hongjian, Yan Junxia, Li Junjian, et al. Soil CO_2 efflux from two shrub stands in a mountain area of the eastern loess plateau[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 30(9): 1895–1904.]

[34] Jia B, Zhou G, Wang Y, et al. Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(1): 60–76.

[35] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 97–103. [Fang Qiulan, Sha Liqing. Soil respiration in tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 97–103.]

[36] 盛浩, 杨玉盛, 陈光水, 等. 土壤异养呼吸温度敏感性(Q_{10})的影响因子[J]. 亚热带资源与环境学报, 2006, 1(1): 74–83. [Sheng Hao, Yang Yusheng, Chen Guangshui, et al. Controls on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: Q_{10} variability and analysis[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2006, 1(1): 74–83.]

[37] 韩丹, 李玉霖, 杨红玲, 等. 模拟增温和改变降雨频率对干旱半干旱区土壤呼吸的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 100–108. [Han Dan, Li Yulin, Yang Hongling, et al. Effects of simulated temperature increase and change of rainfall frequency on soil respiration in arid and semi-arid areas[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 100–108.]

[38] Chimer Rodney A. Soil respiration rates of tropical peatlands in Micronesia and Hawaii[J]. Wetlands, 2004, 24(1): 51–56.

[39] Sánchez M L, Ozores M I, López M J, et al. Soil CO_2 fluxes beneath barley on the central *Spanish plateau*[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2003, 118: 85–95.

[40] Mirco Rodeghiero, Alessandro Cescatti. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1024–1041.

[41] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1581–1585. [Liu Ying, Han Shijie, Hu Yanling, et al. Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestriformis* forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1581–1585.]

[42] 黄看看, 李吉跃, 张学利, 等. 土壤呼吸影响因素研究进展[J]. 内蒙古林业调查设计, 2008, 31(2): 98–100. [Huang Kankan, Li Jiyue, Zhang Xueli, et al. Research progress in factors affecting soil respiration [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2008, 31(2): 98–100.]

[43] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京, 高等教育出版社, 2007. [Luo Yiqi, Zhou Xuhui. Soil Respiration and Environment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.]

[44] 高艳红, 刘立超, 贾荣亮, 等. 沙坡头人工植被演替过程的土壤呼吸特征[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2474–2482. [Gao Yanhong, Liu Lichao, Jia Rongliang, et al. Soil respiration patterns during restoration of vegetation in the Shapotou area, Northern China[J]. Acta EcologicaSinica, 2012, 32(8): 2474–2482.]

[45] 李玉强, 赵哈林, 李玉霖, 等. 沙地土壤呼吸观测与测定方法比较[J]. 干旱区地理, 2008, 31(5): 680–686. [Li Yuqiang, Zhao Halin, Li Yulin, et al. Soil respiration observation in sandy land with reference to different measuring methods[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(5): 680–686.]

[46] 张冬梅, 王美莲, 张鸿翎, 等. 阿拉善荒漠功能灌木群的土壤呼吸动态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 116–122. [Zhang Dongmei, Wang Meilian, Zhang Hongling, et al. Soil respiration activity of desert shrubs in Alashan desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(6): 116–122.]

[47] 张艳如. 黄土丘陵区5种植被土壤呼吸动态及其对环境因子的响应[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2018. [Zhang Yanru. Soil Respiration and its Responses to Environmental Factors in Five Vegetation Types on the Loess Hilly Region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.]

[48] 丁杰萍, 罗永清, 周欣, 等. 植物根系呼吸研究方法及影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(5): 206–216. [Ding Jieping, Luo Yongqing, Zhou Xin, et al. Review of methodology and factors influencing plant root respiration[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(5): 206–216.]

[49] 温军, 周华坤, 姚步青, 等. 三江源区不同退化程度高寒草原土壤呼吸特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 209–218. [Wen Jun, Zhou Huakun, Yao Buqing, et al. Characteristics of soil respiration in different degraded alpine grassland in the source region of Three- River[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2014, 38(2): 209–218.]

[50] 袁渭阳, 李贤伟, 张健, 等. 不同年龄巨桉林土壤呼吸及其与土壤温度和细根生物量的关系[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 1–8. [Yuan Weiyang, Li Xianwei, Zhang Jian, et al. Soil respiration variations and their relationships with soil temperature and fine root biomass in an age series of *Eucalyptus grandis*[J]. Chinese Journal of Forestry, 2009, 45(11): 1–8.]

[51] 刁银霞, 牛莉平, 许嘉巍, 等. 长白山苔原植被变化对土壤呼吸影响研究[J]. 西北植物学报, 2020, 40(12): 2130–2139. [Diao Yinxia, Niu Liping, Xu Jiawei, et al. Effects of tundra vegetation change on soil respiration in the Tundra of Changbai Mountain[J]. Acta Botanica Boreali- Occidentalia Sinica, 2020, 40(12): 2130–2139.]

[52] 张泽凡, 张学珍. 黄土高原植被恢复对土壤物理参数的影响

——基于已发表数据的荟萃分析[J]. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1012−1025. [Zhang Zefan, Zhang Xuezhen. Effects of vegetation restoration on soil physical parameters on the Loess Plateau: A meta-analysis based on published data[J]. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1012−1025.]

[53] 范跃新, 杨玉盛, 郭剑芬, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤呼吸及其温度敏感性的变化[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1155−1165. [Fan Yuexin, Yang Yusheng, Guo Jianfen, et al. Changes in soil respiration and its temperature sensitivity at different successional stages of evergreen broadleaved forests in mid-subtropical China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(11): 1155−1165.]

[54] Priess J A, de Koning G H J, Veldkamp A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 85: 269−279.

Research on soil respiration and its influence factors on *Hedysarum laeve* shrubbery of different ages at Mu Us sandy land

HAI Long[1,2], ZHOU Mei[1], ZHANG Jiakai[1], HONG Guangyu[2,3], LI Fengzi[2,3], FEI Fei[2]

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. Key Laboratory For Sandy Land and Desert Ecosystem and Ecological Engineering of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: To explore the trend of the change of the soil respiration flux and main influencing factors in the process of desertification reversal, 9 a, 18 a and 30 a ages of Hedysarum laeve shrubbery and no afforestation quicksand land (CK) were selected at Mu Us sandy land in Northern China. Using the Li−8100 carbon flux observation system which produced in the United States, measured soil respiration from May to October. At the same time, the main influencing factors were determined and analyzed. The results showed that: (1) Both soil respiration rate and flux increased first and then decreased in the growth season from May to October, and the highest value appeared in July. (2) The soil respiration rate and flux showed a continuous increasing trend with the age of the Hedysarum laeve shrubbery, the Q_{10} value shows a continuous downward trend. From May to October in the growing season, the order of average soil respiration rate was: 30 a (2.16 μmol·m^{-2}·s^{-1})>18 a (1.98 μmol·m^{-2}·s^{-1})>9 a (1.41 μmol·m^{-2}·s^{-1})>CK (0.24 μmol·m^{-2}·s^{-1}); the soil respiration carbon flux was 30 a (365.74 g C·m^{-2})>18 a (313.63 g C·m^{-2})>9 a (218.66 g C·m^{-2})>CK (40.08 g C·m^{-2}). (3) The seasonal variation of soil respiration rate in CK, 9 a and 18 a plots was mainly affected by the coupling effect of soil temperature and water (P<0.01), while the main control factor in 30 a plots was soil temperature (P<0.01). (4) Soil respiration flux was positively correlated with vegetation biomass, soil organic carbon and total nitrogen content (P<0.05).

Keywords: soil respiration; controlling factors; *Hedysarum laeve*; Mu Us sandy land